



①⑨ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

①⑫ **Offenlegungsschrift**
①⑩ **DE 101 36 754 A 1**

⑤⑦ Int. Cl.⁷:
G 01 N 9/24
G 01 F 23/296
G 01 N 29/16
G 21 C 17/022

②① Aktenzeichen: 101 36 754.6
②② Anmeldetag: 27. 7. 2001
④③ Offenlegungstag: 13. 2. 2003

DE 101 36 754 A 1

⑦① Anmelder:
Siemens AG, 80333 München, DE

⑦② Erfinder:
Bechtold, Mario, 91334 Hemhofen, DE; Vester,
Markus, Dr., 90471 Nürnberg, DE

⑤⑥ Entgegenhaltungen:

DE	35 41 613 1
US	55 54 936
US	52 49 463
US	47 86 857
US	38 12 422

##0Bechtold, Mario, 91334 Hemhofen, DE; Vester,
Markus, Dr., 90471 Nürnberg, DE

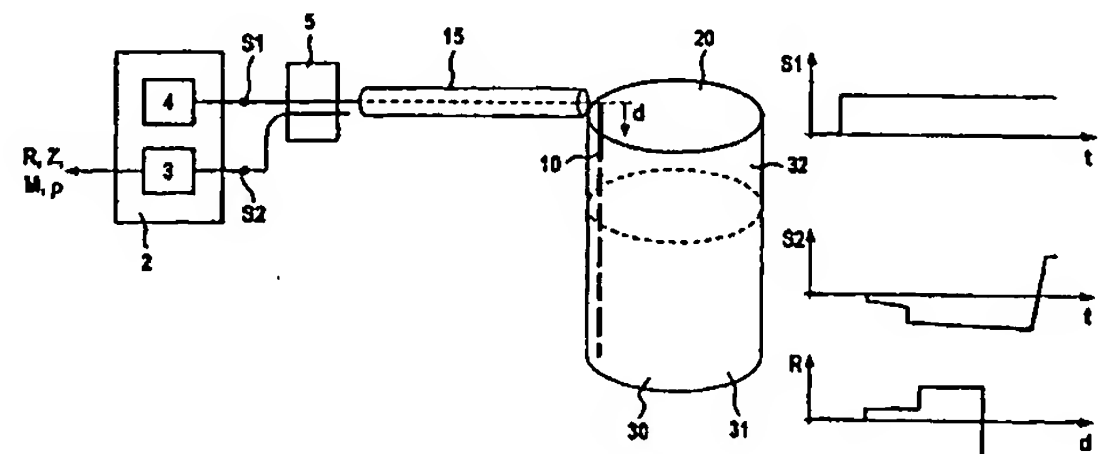
H

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ Verfahren und Vorrichtung zur Dichtebestimmung

⑤⑦ Bei dem Verfahren und der Vorrichtung zur Dichtebestimmung eines in einem Behälter (20) befindlichen Mediums (30) mittels einer in den Behälter (20) hineinragenden Sonde (10) wird ein Abfragesignal (S1) in die Sonde (10) eingespeist und ein durch das Abfragesignal (S1) hervorgerufenen Antwortsignal (S2) detektiert. Mittels des Zeitverlaufs des Antwortsignals (S2) wird ein Reflexionsfaktorverlauf (R) des Mediums (30) längs der Sonde (10) bestimmt. Der Reflexionsfaktorverlauf (R) wird zur Ermittlung des Dichteverlaufs (ρ) des Mediums (30) längs der Sonde (10) verwendet.



DE 101 36 754 A 1

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Dichtebestimmung eines in einem Behälter befindlichen Mediums mittels einer in den Behälter hineinragenden Sonde.

5 [0002] Während des Betriebes eines Kernkraftwerks oder auch während verschiedener Prozessabläufe in der chemischen Verfahrenstechnik ist es notwendig, eine Messgröße innerhalb eines befüllten Behälters zu ermitteln. Aufgrund der hohen Temperatur oder auch der gegebenenfalls innerhalb des Behälters herrschenden radioaktiven Strahlungsintensität können innerhalb des zu überwachenden Behälters keine elektronischen Messmittel eingesetzt werden. Insbesondere beim Betrieb eines Kernreaktordruckbehälters ist die Kenntnis über das Vorhandensein und den Zustand des im Reaktor-
10 behälter befindlichen Kühlmediums von besonderem Interesse. Diese Messinformation soll auch in einem Störfall zuverlässig ermittelt werden können.

[0003] Aus der DE 35 41 613 A1 ist ein Verfahren zur Füllstandsmessung in einem Reaktordruckbehälter bekannt. Bei diesem Verfahren wird ein Differenzdruck zwischen dem eigentlichen Reaktordruckbehälter und einer Vergleichssäule gemessen. Daraus und unter Berücksichtigung der Flüssigkeits- und Dampfdichten wird in einer Auswerteeinheit der
15 Füllstand ermittelt. Dieses Messverfahren weist jedoch insbesondere bei den in einem Störfall vermehrt auftretenden Turbulenzen innerhalb des Kühlmediums im Reaktordruckbehälter Ungenauigkeiten auf.

[0004] In dem Fachaufsatz von H. Müller-Nordhoff "Füllstandsmessung nach der TDR-Methode im Aufbereitungs- und kohlenveredelungsbetrieben" aus Glückauf-Forschungshefte 44 (1983), Heft 5, Seiten 214 bis 218 ist ein anderes Messverfahren zur Füllstandsmessung beschrieben. Dieses sogenannte Zeitbereichs-Reflektometrie-Verfahren (Time
20 Domain Reflectometry = TDR) beruht auf der Messung der Laufzeit eines Hochfrequenzimpulses längs einer Sonde bis hin zu einer Unstetigkeitsstelle, wo ein Teil der eingespeisten Hochfrequenzenergie reflektiert wird. Diese Unstetigkeitsstelle wird dann als Füllstandshöhe des im Behälter befindlichen Mediums interpretiert.

[0005] Dieses auf einer reinen Laufzeit-Messung basierende TDR-Verfahren zur Füllstandsmessung wurde in seiner Messgenauigkeit dadurch verbessert, dass an der in das zu detektierende Medium hineinragenden Sonde an definierter
25 Stelle Referenzmarken angebracht wurden. Dadurch erhält man im Antwortsignal zusätzliche durch die Referenzmarken bedingte Reflexionsimpulse, deren Reflexionsorte im Gegensatz zu der zu detektierenden Füllstandshöhe exakt bekannt sind. Deshalb können die für die Referenzmarken detektierten Laufzeiten zur Kalibrierung des TDR-Verfahrens herangezogen werden. Ein solches Verfahren ist in der US 5,249,463 beschrieben.

[0006] Die auf einer Laufzeitmessung basierenden Standard-TDR-Verfahren weisen aber bei einem Einsatz zur Füll-
30 standsmessung eines flüssigen Kühlmediums mit zunehmender Temperatur eine steigende Messungenauigkeit auf. Mit steigender Temperatur verdampft nämlich zum einen ein Anteil des Kühlmediums und zum anderen nähern sich die Ausbreitungsgeschwindigkeiten in dem dampfförmigen und dem flüssigen Anteil des Mediums einander an, so dass keine exakt definierte Unstetigkeitsstelle beispielsweise in Form einer Flüssigkeitsoberfläche mehr vorliegt. Bei Wasser steigt insbesondere oberhalb von 200°C die Dichte des Wasserdampfs an und die des flüssigen Wassers fällt, bis sich beide
35 Werte im kritischen Punkt bei 374°C treffen. Mangels markanter Unterschiede in der Ausbreitungsgeschwindigkeit führen die Standard-TDR-Verfahren in dem genannten hohen Temperaturbereich also zu einem nicht unerheblichen Messfehler, der zusätzlich durch Turbulenzen und die damit verbundene Bildung von Mischphasen aus dem dampfförmigen und dem flüssigen Aggregatzustand des Mediums erhöht wird. Der Aggregatzustand wird manchmal auch als Phasen-
zustand oder einfach als Phase bezeichnet.

[0007] Zur Umgehung dieser Schwierigkeiten wird in der US 4,786,857 ein modifiziertes TDR-Verfahren beschrieben, bei dem anstelle einer einzigen langen Sonde eine Vielzahl deutlich kürzerer Messsonden innerhalb des zu überwachenden Behälters vorgesehen sind. Geeignete Ausführungsformen dieser kurzen Messsonden sind in der US 5,554,936 be-
40 schrieben. Jede dieser etwa 30 cm langen Einzelsonden ist mit einer eigenen TDR-Auswerteeinheit verbunden. Aus den Reflexionsstellen am Anfang und am Ende jeder Einzelsonde lässt sich mit den Standard-TDR-Methoden eine mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit im Messbereich jeder Einzelsonde ermitteln. Zusätzlich werden vorab ermittelte Antwortsignale für verschiedene Betriebszustände der Messsonde (Messsonde zum Teil in flüssigem Wasser eingetaucht, Messsonde in Wasserdampf, Messsonde in Mischphase aus Wasserdampf und flüssigem Wasser) bei der Auswertung mit berücksichtigt. Neben einer Erhöhung der Messgenauigkeit lassen sich mit diesem Verfahren auch zusätzliche Informationen über das Medium in dem Behälter ermitteln. Allerdings ist der apparative Aufwand aufgrund der vielen Einzelson-
45 den und ihrer zugehörigen Auswerteeinheiten beträchtlich. Weiterhin wird die Ortsauflösung und damit die Messgenauigkeit dieses modifizierten TDR-Verfahrens durch die Anzahl und die Länge der Einzelsonden begrenzt.

[0008] Die Aufgabe der Erfindung besteht deshalb darin, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Dichtebestimmung eines in einem Behälter befindlichen Mediums mittels einer in den Behälter hineinragenden Sonde anzugeben, welche eine hohe Messgenauigkeit bei gleichzeitig geringem apparativen Aufwand ermöglichen.

55 [0009] Zur Lösung dieser Aufgabe wird ein Verfahren entsprechend den Merkmalen des unabhängigen Patentanspruchs 1 sowie eine Vorrichtung entsprechend den Merkmalen des unabhängigen Patentanspruchs 13 angegeben.

[0010] Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Dichtebestimmung eines in einem Behälter befindlichen Mediums mittels einer in den Behälter hineinragenden Sonde wird

- 60 a) ein Abfragesignal in die Sonde eingespeist,
- b) ein durch das Abfragesignal hervorgerufenen Antwortsignal detektiert,
- c) ein Reflexionsfaktor- oder Impedanzverlauf des Mediums längs der Sonde mittels des Zeitverlaufs des Antwortsignals und
- d) ein Dichteverlauf des Mediums längs der Sonde mittels des Reflexionsfaktor- oder Impedanzverlaufs bestimmt.

65

[0011] Die erfindungsgemäße Vorrichtung zur Dichtebestimmung eines in einem Behälter befindlichen Mediums mittels einer in den Behälter hineinragenden Sonde umfasst mindestens

- a) Mittel zur Erzeugung und Einspeisung eines Abfragesignals in die Sonde,
- b) Mittel zur Detektion und Auswertung eines durch das Abfragesignal hervorgerufenen Antwortsignals, wobei
- c) die Mittel zur Detektion und Auswertung ausgebildet sind zur Bestimmung eines Reflexionsfaktor- oder Impedanzverlaufs des Mediums längs der Sonde mittels des Zeitverlaufs des Antwortsignals und zur Bestimmung eines Dichteverlaufs des Mediums längs der Sonde mittels des Reflexionsfaktor- oder Impedanzverlaufs.

5

[0012] Die Erfindung beruht dabei auf der Erkenntnis, dass eine hohe Messgenauigkeit auch dann zu erreichen ist, wenn nur eine einzige Messsonde wie bei einem Standard-TDR-Verfahren zur Bewachung des in dem Behälter befindlichen Mediums verwendet wird. Im Gegensatz zu einem Standard-TDR-Verfahren wird jedoch nicht eine einfache Laufzeitmessung eines an einer Unstetigkeitsstelle reflektierten Antwortsignals erfasst und ausgewertet, sondern das Antwortsignal mit seinem kompletten zeitlichen Verlauf für die Auswertung herangezogen. Der Informationsgehalt des Antwortsignals wird somit deutlich besser ausgenutzt als bei einer bloßen Auswertung einzelner Reflexionsimpulse innerhalb des Antwortsignals. Es wurde erkannt, dass unter Berücksichtigung auch der anderen Teile des Zeitverlaufs des Antwortsignals eine örtliche Verteilung der Impedanz in Richtung der Sonde und daraus einen Dichteverlauf des Mediums längs dieser Richtung ermittelt werden können.

10

15

[0013] Die Impedanz, die das eingespeiste Abfragesignal bei seinem Weg durch die Sonde erfährt, wird zum einen durch die vorgegebene Sonden-Geometrie und zum anderen durch das die Sonde umgebende Medium bestimmt. Für die Auswertung ist der zuletzt genannte Anteil maßgeblich. Alternativ zur Bestimmung des Impedanzverlaufs längs der Sonde kann auch der Reflexionsfaktorverlauf in Sondenrichtung ermittelt werden. Die elektrische Impedanz und der Reflexionsfaktor lassen sich über eine wohlbekannte einfache Formelbeziehung leicht ineinander überführen. Beide Darstellungsformen enthalten den gleichen Informationsgehalt über das zu überwachende Medium und sind deshalb äquivalent einsetzbar.

20

[0014] Das Medium kann in Form eines Stoffes, eines Stoffgemisches oder auch einer Schichtung mehrerer Stoffe (beispielsweise Wasser am Behälterboden und darüber normale Umgebungsluft) ausgebildet sein. Außerdem ist es auch möglich, dass das zu überwachende Medium gleichzeitig in mehreren Aggregatzuständen vorliegt. Die einzelnen Aggregatzustände (beispielsweise flüssig und gasförmig) können dabei längs der Sonde in beliebig abwechselnder Reihenfolge vorkommen. Darüber hinaus ist auch eine Mischphase aus beiden Aggregatzuständen möglich. Obwohl sich gerade im zuletzt genannten Fall keine ausgeprägten Unstetigkeitsstellen im Reflexionsfaktor- oder Impedanzverlauf längs der Sonde ausbilden und somit ein Standard-TDR-Verfahren nicht mehr anwendbar ist, sind dennoch Informationen über den Zustand des Mediums aus der örtlichen Verteilung dieser wichtigen Kenngrößen längs der Sonde zu entnehmen.

25

30

[0015] Insbesondere lässt sich auch der Dichteverlauf aus dem Verlauf der elektrischen Impedanz und des Reflexionsfaktors ermitteln. Die Dichte ist eine wichtige Kenngröße zur Beurteilung der aktuellen Verhältnisse innerhalb des zu überwachenden Behälters.

[0016] Die Messgenauigkeit kann bei dem Verfahren auf einfache Weise über die Anzahl der berücksichtigten Abtastwerte des Abfragesignals erhöht werden. Eine Erhöhung des apparativen Aufwandes im Innenbereich des Behälters in Form von zusätzlichen Messsonden wie beim Stand der Technik ist also nicht erforderlich. Damit lässt sich das Verfahren auch an einer bereits bestehenden Überwachungseinrichtung mit einer einzigen im Inneren des Behälters angebrachten Sonde nachrüsten, wobei zugleich eine höhere Messgenauigkeit erreicht wird. Die wesentlichen Änderungen hierfür können in der leichter zugänglichen Auswerteeinheit vorgenommen werden.

35

[0017] Vorteilhafte Ausführungsformen des Verfahrens und der Vorrichtung ergeben sich aus den von Anspruch 1 bzw. Anspruch 13 abhängigen Ansprüchen.

40

[0018] Bei einer ersten vorteilhaften Ausführungsvariante wird der Reflexionsfaktor- oder Impedanzverlauf mittels eines Rekursionsalgorithmus aus dem Zeitverlauf des Antwortsignals bestimmt. Dadurch können auch gegebenenfalls auftretende Mehrfachreflexionen zwischen Teilbereichen der Messsonde mit erfasst und aus dem Antwortsignal herausgerechnet werden.

45

[0019] Bevorzugt ist ein Verfahren zur Ermittlung des Reflexionsfaktor- und Impedanzverlaufs, bei dem in der Auswerteeinheit eine fiktive Einteilung des Mediums in mehrere Schichten, die quer zur Sonde verlaufen, erfolgt. Die zunächst noch unbekannte räumliche Ausdehnung in Längsrichtung der Sonde ist jeweils so bemessen, dass die Laufzeit des Abfragesignals in jeder Schicht gleich ist. Beginnend mit der in Einspeiserichtung des Abfragesignals als erstes angeordneten Schicht wird für jede Schicht ein aktueller Reflexionsfaktor, eine aktuelle Ausbreitungsgeschwindigkeit sowie die aktuelle Schichtausdehnung in Einspeiserichtung des Abfragesignals ermittelt. Durch Zuordnung des aktuellen Reflexionsfaktors zu dem aktuellen Ort ergibt sich sukzessive die gewünschte örtliche Verteilung des Reflexionsfaktorverlaufs. Bei Bedarf kann diese Verteilung auch in eine Impedanzverteilung umgerechnet werden. Der aktuelle Reflexionsfaktor wird dabei der Grenze zwischen der gerade betrachteten aktuellen Schicht und der angrenzenden im vorhergehenden Rekursionsschritt der betrachteten Schicht zugeordnet. Die Ermittlung erfolgt unter Berücksichtigung des empfangenen und gespeicherten zeitlichen Verlaufs des Abfragesignals, des bekannten eingespeisten Antwortsignals und der in den vorherigen Schritten des Rekursionsalgorithmus ermittelten Reflexionsfaktoren an den Grenzen zwischen den vorhergehenden Schichten. Die aktuelle Ausbreitungsgeschwindigkeit der aktuellen Schicht wird aus dem aktuellen Reflexionsfaktor sowie der in dem vorhergehenden Rekursionsschritt berechneten Ausbreitungsgeschwindigkeit der angrenzenden vorhergehenden Schicht bestimmt.

50

55

60

[0020] Die Ausbreitungsgeschwindigkeit kann auch als Mittelwert der sich innerhalb der aktuellen Schicht einstellenden Geschwindigkeitsverteilung interpretiert werden. Da die Schichtabmessungen jedoch üblicherweise sehr klein gewählt werden können, stellt dies keine Beeinträchtigung der Messgenauigkeit des Verfahrens dar.

[0021] Mit Kenntnis der aktuellen Ausbreitungsgeschwindigkeit kann der innerhalb der fest vorgegebenen Laufzeit zurückgelegte Weg und damit die räumliche Ausdehnung der aktuellen Schicht ermittelt werden. Dem aktuellen Reflexionsfaktor wird der Ort der Grenze zwischen aktueller und angrenzender, im vorherigen Rekursionsschritt betrachteter Schicht zugewiesen. Dieser Grenzort ist im vorhergehenden Rekursionsschritt über die ermittelte Ausdehnung der vorhergehenden Schicht errechnet worden. Nach Durchlaufen aller Rekursionsschritte erhält man die örtliche Verteilung des

65

Reflexionsfaktors längs der Sonde.

[0022] Die Zahl der Schichten, in die der Messbereich längs der Sonde eingeteilt wird, ist gleich der um 1 reduzierten Anzahl der äquidistanten Zeitintervalle, in die das Antwortsignal unterteilt wird. Die sich im Laufe des Rekursionsalgorithmus ergebenden lokalen Abtastwerte des Reflexionsfaktor- oder Impedanzverlaufs sind dagegen in der Regel nicht äquidistant voneinander beabstandet. Dennoch lässt sich auch die örtliche Auflösung einfach durch Erhöhung der zeitlichen Abtastrate verbessern.

[0023] Vorzugsweise wird zur Dichtermittlung zunächst in jedem Rekursionsschritt eine aktuelle relative Dielektrizitätskonstante für die gerade betrachtete aktuelle Schicht bestimmt. Dies geschieht unter Zugrundelegung des für die aktuelle Schicht bestimmten aktuellen Reflexionsfaktors und der für die im vorherigen Rekursionsschritt bestimmten relativen Dielektrizitätskonstante der angrenzenden vorhergehenden Schicht. Aus der aktuellen relativen Dielektrizitätskonstante wird ein aktueller Dichtewert für die gerade betrachtete Schicht errechnet. Insbesondere bei einer vorgegebenen oder angenommenen Temperatur im Behälterinneren besteht nämlich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen relativer Dielektrizitätskonstante und der Dichte des im Behälter befindlichen Mediums.

[0024] Bevorzugt ist eine weitere Variante, bei der aus der Dichte eine weitere interessante Kenngröße wie z. B. ein Füllstand innerhalb des Behälters oder auch ein Aggregatzustand ermittelt wird. Bei Zugrundelegung entsprechend kombinierter Formelbeziehungen lassen sich diese zuletzt genannten Kenngrößen jedoch auch direkt aus dem Reflexionsfaktor- oder Impedanzverlauf bestimmen.

[0025] Bevorzugt ist eine weitere Ausführungsform, bei der zusätzlich eine Temperatur des Behälterinneren detektiert und bei der Auswertung mit berücksichtigt wird. Je genauer die Temperatur innerhalb des Behälters bekannt ist, um so exakter lässt sich der Dichteverlauf längs der Sonde aus dem Reflexionsfaktor- oder Impedanzverlauf bestimmen. Deshalb ist es günstig, wenn längs der Messsonde mehrere Temperaturmessstellen vorgesehen sind. Dann kann für die Berechnungen in den jeweiligen Schichten ein möglichst genauer Wert der lokalen Temperatur verwendet werden. Für eine ausreichende Messgenauigkeit ist es jedoch nicht unbedingt erforderlich, innerhalb jeder Schicht eine gesonderte Temperaturmessung durchzuführen. Üblicherweise treten nämlich keine signifikanten Temperaturschwankungen im Bereich der typischerweise verwendeten Schichtabmessungen (z. B. einige cm) auf.

[0026] Die Messgenauigkeit wird außerdem im Rahmen einer weiteren Variante dadurch gesteigert, dass eine oder mehrere Referenzmarken an definierter Stelle der Sonde vorgesehen sind. Diese Referenzmarken führen zu besonders markanten Reflexionsimpulsen im Abfragesignal und bilden sich auch in dem errechneten Reflexionsfaktor- oder Impedanzverlauf ab. Da die Position der Referenzmarken bekannt ist, kann somit eine Korrektur oder Kalibrierung des Verfahrens vorgenommen werden. Eine weitere Überprüfungsmöglichkeit ergibt sich aus der Reflexion am Ende der Sonde. Aus der Laufzeit dieser Endreflexion und weiteren bekannten Vorgaben, beispielsweise der anfänglich vorhandenen Füllmenge des Mediums, kann eine mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit längs der kompletten Sonde bestimmt werden. Damit lassen sich die in den einzelnen Schichten errechneten Werte auf Plausibilität überprüfen und gegebenenfalls entsprechend anpassen. Neben der Laufzeit der Endreflexion kann auch deren Amplitude ausgewertet werden. Die Amplitude gibt über die Absorption und die Leitfähigkeit im Medium Aufschluss. Daraus lässt sich beispielsweise ableiten, ob die Ionenkonzentration im Medium gestiegen ist. Ein solcher Anstieg wäre ein Indiz auf das Vorhandensein unerwünschter dissoziierter Zusätze, z. B. von Borsäure, oder auf die Einwirkung einer ionisierenden Strahlung, z. B. einer radioaktiven Strahlung.

[0027] Bevorzugt hat das Abfragesignal die Form eines sprungförmigen Signals, eines impulsförmigen Signals oder eines Chirp-Signals. Andere Signalformen sind jedoch grundsätzlich ebenfalls möglich. Günstigerweise hat das Abfragesignal darüber hinaus eine Bandbreite von mindestens 50 MHz, vorzugsweise von mindestens 100 MHz. Die verwendete Bandbreite bestimmt neben der zeitlichen Abtastrate die Ortsauflösung und damit die Messgenauigkeit des Verfahrens. So ergibt sich bei einem Abfragesignal mit einer typischerweise eingesetzten Bandbreite von 1 GHz eine Ortsauflösung in der Größenordnung von 7,5 cm. Bei einer sprunghaften Änderung des Dichteverlaufs beispielsweise an einer Grenzfläche des Mediums kann jedoch durch Berücksichtigung von Zusatzmaßnahmen wie etwa einer Kurvenanpassung ("Fit) einer bekannten Sprungantwort an die gemessenen Daten oder eines Verfahrens zur hochauflösenden Entfaltung beispielsweise mit einem Wienerfilter eine deutlich höhere Messauflösung in der Größenordnung von unter 1 cm erreicht werden. Die Messauflösung kann in diesem Fall auch durch ein Extrapolationsverfahren im Frequenzbereich oder eine Zusatzmessung im Zeitbereich zur genauen Ermittlung der zeitlichen Lage des Impedanz- oder Dichtesprungs erhöht werden.

[0028] Bevorzugte Ausführungsbeispiele werden nunmehr anhand der Zeichnung näher erläutert. Zur Verdeutlichung ist die Zeichnung nicht maßstäblich ausgeführt, und gewisse Merkmale sind schematisiert dargestellt. Im Einzelnen zeigen

[0029] Fig. 1 eine Vorrichtung zur orts aufgelösten Reflektionsfaktor- und Dichtebestimmung eines Mediums,

[0030] Fig. 2 eine Schichteinteilung des Untersuchungsgebiets der Vorrichtung nach Fig. 1 sowie orts- und zeitaufgelöste Darstellung der das Antwortsignal bildenden Teilsignale,

[0031] Fig. 3 einen Zusammenhang zwischen relativer Dielektrizitätskonstante und Dichte bei Wasser,

[0032] Fig. 4 eine in der Vorrichtung gemäß Fig. 1 eingesetzte Sonde,

[0033] Fig. 5 eine Sonde mit Temperaturmessstellen und

[0034] Fig. 6 eine Sonde mit Referenzmarken.

[0035] Einander entsprechende Teile sind in den Fig. 1 bis 6 mit denselben Bezugszeichen versehen.

[0036] In Fig. 1 ist eine Vorrichtung zur orts aufgelösten Reflektionsfaktor- und Dichtebestimmung eines Mediums 30, das sich in einem Behälter 20 befindet, dargestellt. Ein in einer Generatoreinheit 4 erzeugtes elektrisches Abfragesignal S1 wird über ein Koppellement 5 und eine Vorlaufstrecke 15 in eine Sonde 10 eingespeist, die in dem Behälter 20 angeordnet ist. Das zu detektierende Medium 30 ist im dargestellten Beispielsfall zweischichtig. Im unteren Teil des Behälters 20 befindet sich eine Wasserbefüllung 31, im oberen Teil des Behälters 20 eine Luft- oder Wasserdampfbefüllung 32. Das Abfragesignal S1 wird in Abhängigkeit des die Sonde 10 umgebenden Mediums 30 reflektiert und läuft als Antwortsignal S2 über die Vorlaufstrecke 15 und das Koppellement 5 zu einer Auswerteeinheit 3, die zusammen mit der

Generatoreinheit 4 in einer Sende-/Empfangseinheit 2 angeordnet ist, zurück. In der Auswerteeinheit 3 wird das Antwortsignal S2 detektiert und aus seinem zeitlichen Verlauf eine örtliche Verteilung eines Reflexionsfaktors R für das Medium 30 in Längsrichtung der Sonde 10 ermittelt. Diese Längsrichtung ist in Fig. 1 durch die Ortskoordinate d angezeigt.

[0037] Anhand des ermittelten Reflexionsfaktorverlaufs R können in der Auswerteeinheit 3 weitere für eine Zustandsbestimmung des Mediums 30 interessante Kenngrößen abgeleitet werden. Anstelle des Verlaufs des Reflexionsfaktors R kann beispielsweise auch ein Verlauf einer elektrischen Impedanz Z des Mediums 30 längs der Sonde 10 angegeben werden. Der Reflexionsfaktor R und die Impedanz Z lassen sich ohne weiteres ineinander umrechnen.

[0038] Aus dem Reflexionsfaktorverlauf R oder dem äquivalenten Impedanzverlauf Z wird als weitere Messgröße M der Verlauf der Dichte ρ des Mediums 30 ermittelt. Weiterhin lassen sich Informationen über den Füllstand oder den Aggregatzustand des Mediums 30 bestimmen.

[0039] Im Gegensatz zu den bekannten Standard-TDR(Time Domain Reflectometry)-Verfahren wird bei dem der Vorrichtung nach Fig. 1 zugrunde liegenden Verfahren nicht die Laufzeit des Abfragesignals S1 bis zu einer bestimmten Reflexionsstelle – im Beispiel von Fig. 1 beispielsweise der Grenzfläche zwischen der Wasserbefüllung 31 und der Luft- oder Dampfbefüllung 32 – ermittelt. Vielmehr wird der komplette Verlauf des Reflexionsfaktors R oder der Impedanz I längs der Sonde 10 ermittelt. Damit steht in der Auswerteeinheit 3 ein deutlich höherer Informationsgehalt zur Verfügung. Insbesondere ist eine Messgrößenermittlung auch dann möglich, wenn im Behälter 10 – anders als im in Fig. 1 dargestellten Fall – keine scharf definierte Reflexionsstelle in Form einer Grenzfläche zwischen unterschiedlichen Stoffen vorhanden ist. Gerade dann kommt es bei Standard-TDR-Verfahren zu Messungenauigkeiten. Eine derartige Situation kann sich aber durchaus einstellen, insbesondere wenn es sich bei dem Behälter 10 um einen Kernreaktordruckbehälter handelt, der zur Kühlung mit Wasser 31 befüllt ist. Im Störfall können sich aufgrund der dann auftretenden hohen Temperatur und der Turbulenzen im Medium 30 ohne weiteres Mischphasen zwischen dem Wasser 31 und dem Wasserdampf 32 ausbilden. Bei hohen Temperaturen nähern sich die elektrische Impedanz und damit auch die Dichte von flüssigem Wasser und von Wasserdampf einander an. Im Störfall ist es deshalb durchaus möglich, dass keine mit einem Standard-TDR-Verfahren über eine Laufzeitmessung längs der Sonde 10 detektierbare scharfe Reflexionsstelle mehr vorliegt.

[0040] Das Verfahren zur Bestimmung des Reflexionsfaktorverlaufs R ist dagegen auch in dieser Grenzsituation funktionstüchtig und ermöglicht eine Aussage über den Zustand im Behälterinneren. Zur Ermittlung des Reflexionsfaktorverlaufs R wird in der Auswerteeinheit 3 ein eindimensionaler Rekursionsalgorithmus unter Berücksichtigung des Abfragesignals S1 und des Antwortsignals S2 durchgeführt. Das Funktionsprinzip dieses Rekursionsalgorithmus wird im Folgenden anhand der Darstellungen von Fig. 2 erläutert.

[0041] Als Abfragesignal S1 wird eine Sprungfunktion in die Sonde 10 eingespeist. Ihr Verlauf über der Zeit t sowie ein beispielhafter zeitlicher Verlauf des empfangenen Antwortsignals S2 ist in dem oberen bzw. dem unteren Diagramm von Fig. 2 gezeigt. Zur Auswertung werden die Sonde 10 und das sie umgebende Medium 30 zunächst in mehrere fiktive Schichten 101, 102 und 103 eingeteilt. Die Einteilung wird dabei so vorgenommen, dass das Abfragesignal S1 für das Passieren (Hin- und Rückrichtung) jeder der Schichten 101, 102 und 103 eine identische fiktive Laufzeit τ benötigt. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeiten innerhalb der einzelnen Schichten 101, 102 und 103 in der Regel nicht identisch sind, ergeben sich bei Vorgabe jeweils gleicher Laufzeiten τ unterschiedliche räumliche Ausdehnungen der einzelnen Schichten 101, 102 und 103 in Richtung der Ortskoordinate d ein. Diese räumlichen Ausdehnungen sind zunächst unbekannt.

[0042] Das Abfragesignal S1 und das Antwortsignal S2 werden zeitlich äquidistant mit einem Rastermaß, das genau der Laufzeit τ entspricht, abgetastet. Sowohl die Schichteneinteilung der Sonde 10 als auch die zeitliche Rasterung sind in Fig. 2 kenntlich gemacht. Der zeitlichen Abtastung ist die diskrete Zeitkoordinate k zugeordnet, der örtlichen Schichteneinteilung der Sonde 10 die diskrete Ortskoordinate z, die die Nummer der jeweiligen Schicht 101, 102 und 103 wiedergibt. In die Auswertung gehen die Werte des Abfragesignals S1 und des Antwortsignals S2 an den zeitlichen Abtaststellen $t = k \cdot \tau$ mit $k = 1, 2, \dots$ ein.

[0043] Der eindimensionale Rekursionsalgorithmus basiert auf der Überlegung, dass das eingespeiste Abfragesignal S1 an jeder Grenzfläche zwischen benachbarten Schichten 101, 102 und 103 teils reflektiert und teils transmittiert wird. Dadurch kommt es zu jedem diskreten Zeitpunkt und an jeder von dem Abfragesignal erfassten Grenzfläche zu einer Aufteilung in einen vorlaufenden und einen zurücklaufenden Signalanteil. Entsprechend der Nomenklatur der Wellenleitertheorie sind die vorlaufenden Anteile mit a und die zurücklaufenden Anteile mit b bezeichnet. Beide Signalanteile a und b hängen von der diskreten Ortskoordinate z und von der diskreten Zeitkoordinate k ab. Vorausgesetzt, dass die Sonde 1 und das überwachende Medium 30 zu Beginn der Messung energiefrei sind, ist das Antwortsignal S1 zum ersten Betrachtungszeitpunkt $k = 1$ gleich dem am Sondenanfang reflektierten Anteil $b(0,1)$ des in die Sonde 10 eingespeisten Abfrageimpulses $a(0,0)$. Der Zusammenhang zwischen dem eingespeisten Signal $a(0,0)$ und dem reflektierten Signal $b(0,1)$ wird durch den Reflexionsfaktor R(1) an der Grenzfläche zur ersten Schicht 101 mit der diskreten Ortskoordinate $z = 1$ bestimmt.

[0044] Der Reflexionsfaktor R(z) an einer Grenzfläche ergibt sich aus den Impedanzen Z(z) und Z(z-1) der beiden aneinandergrenzenden Schichten mit der diskreten Ortskoordinate z bzw. z-1:

$$R(z) = \frac{Z(z) - Z(z-1)}{Z(z) + Z(z-1)}, \quad (1)$$

wobei sich die Impedanz Z(z) aus einem vorher berechenbaren konstanten Anteil A_{Geo} , der durch die Geometrie der eingesetzten Sonde bestimmt ist, sowie einem durch das zu überwachende Medium 30 bestimmten Anteil zusammensetzt:

$$Z(z) = A_{Geo} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \cdot \sigma(z)}}. \quad (2)$$

[0045] Hierbei steht μ_0 für die natürliche Permeabilität, ϵ_0 für die natürliche Dielektrizitätskonstante und ϵ_r für die relative Dielektrizitätskonstante. Die relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r ist als einzige der eingehenden Größen von der Ortskoordinate z abhängig. Gleichung (2) gilt insbesondere dann, wenn sich in dem Medium 30 nur dielektrische Kontraste ausbilden. Das Medium 30 weist dann kein magnetisches Verhalten auf (d. h. $\mu = \mu_0$). Dies ist bei praktisch allen gängigen Kühlmitteln, d. h. auch bei Wasser, der Fall. Übergänge zwischen verschiedenen Aggregatzuständen führen dann nur zu einer Veränderung der Dielektrizitätskonstante. Bei einem derartigen Medium 30 variieren die elektrische Impedanz $Z(z)$ und eine Ausbreitungsgeschwindigkeit $c(z)$ in der zugehörigen Schicht 101, 102 oder 103 nicht unabhängig voneinander. Es gilt:

$$c(z) = \frac{Z(z)}{\mu_0} \quad (3)$$

[0046] Damit lässt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit $c(z)$ der aktuellen Schicht mit der Ortskoordinate z aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit $c(z-1)$ der vorhergehenden Schicht mit der Ortskoordinate $z-1$ sowie dem Reflexionsfaktor $R(z)$ der aktuellen Schicht berechnen:

$$c(z) = c(z-1) \cdot \frac{1+R(z)}{1-R(z)} \quad (4)$$

[0047] Ebenso kann auch die relative Dielektrizitätskonstante $\epsilon_r(z)$ der aktuellen Schicht aus der relativen Dielektrizitätskonstante $\epsilon_r(z-1)$ der vorhergehenden Schicht sowie dem aktuellen Reflexionsfaktor $R(z)$ der aktuellen Schicht berechnet werden:

$$\epsilon_r(z) = \epsilon_r(z-1) \cdot \left(\frac{1-R(z)}{1+R(z)} \right)^2 \quad (5)$$

[0048] Berücksichtigt man außerdem den Zusammenhang zwischen dem Reflexionsfaktor $R(z)$ und dem Transmissionsfaktor $T(z)$, der den eine Grenzschicht passierenden Anteil beschreibt:

$$T(z) = \sqrt{1-R(z)^2} \quad (6)$$

sowie die Inversbeziehung zu Gleichung (1):

$$Z(z) = Z(z-1) \cdot \frac{1+R(z)}{1-R(z)} \quad (7)$$

liegen alle Voraussetzungen vor, um über eine in Zeit und Raum sukzessive fortschreitende Betrachtung alle interessierenden Größen des Mediums 30 zu berechnen. Dies sind beispielsweise die Reflexionsfaktoren $R(z)$, die Impedanz $Z(z)$, die Ausbreitungsgeschwindigkeiten $c(z)$, die relativen Dielektrizitätskonstanten $\epsilon_r(z)$ aller Schichten 101, 102 und 103 ebenso wie die örtlichen Positionen $d(z)$ der Grenzflächen zwischen den benachbarten Schichten 101, 102 oder 103. Die Lage dieser Grenzflächen ergibt sich aus:

$$d(z) = d(z-1) + \tau \cdot c(z) \quad (8)$$

[0049] Das Prinzip wird anhand der in der Auswerteeinheit 3 für die beiden ersten Abtastwerte des Antwortsignals S_2 durchgeführte Auswertung erläutert. Der erste Reflexionsfaktor $R(1)$ wird aus den ersten Abtastwerten $a(0,0)$ und $b(0,1)$ des Abfragesignals S_1 bzw. des Antwortsignals S_2 ermittelt. Unter Berücksichtigung der bekannten Impedanz der der Sonde 10 vorgeschalteten Vorlaufstrecke 15 sowie der Gleichungen (7) und (3) kann damit auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit $c(1)$ innerhalb der ersten Schicht 101 errechnet werden. Die Ausdehnung der ersten Schicht 101 und damit die Position der Grenzfläche zwischen den Schichten 101 und 102 lassen sich dann über Gleichung (8) bestimmen. Durch Zuordnung des ermittelten Reflexionsfaktors $R(1)$ zu dem Ort des Sondenanfangs, d. h. des Anfangs der ersten Schicht 101, erhält man den ersten Wert der gesuchten lokalen Verteilung des Reflexionsfaktorverlaufs R längs der Sonde 10.

[0050] Der zweite Abtastwert $b(0,2)$ des Abfragesignals S_2 ergibt sich aus einer Summation des am Sondenanfang reflektierten Anteils des zweiten Abtastwerts $a(0,1)$ des Abfragesignals S_1 und des Anteils des ersten Abtastwerts $a(0,0)$ des Abfragesignals S_1 , der zunächst am Sondenanfang transmittiert, dann an der Grenzfläche zwischen den Schichten 101 und 102 reflektiert und am Sondenanfang wieder transmittiert worden ist.

[0051] Wie auch aus der in Fig. 2 angegebenen Beziehung für $b(0,2)$ hervorgeht, ist die einzige unbekannte Größe der Reflexionsfaktor $R(2)$ an der Grenzfläche zwischen den Schichten 101 und 102. Damit kann in dem zweiten Rekursionsschritt zunächst der Reflexionsfaktor $R(2)$ ermittelt werden. Die weiteren interessierenden Größen ergeben sich dann analog zu der für die erste Schicht 101 angegebenen Vorgehensweise unter Berücksichtigung der Gleichungen (2) bis (8).

[0052] Bei den folgenden Rekursionsschritten werden jeweils alle neu dazukommenden vor- und zurücklaufenden Anteile $a(z, k)$ bzw. $b(z, k)$ bestimmt, um daraus und aus den bereits vorher bestimmten Größen den Reflexionsfaktor $R(z)$ und alle anderen interessierenden Größen der aktuellen Schicht zu ermitteln.

[0053] Nach vollständigem Durchlaufen des Rekursionsalgorithmus liegt dann der Verlauf des Reflexionsfaktors $R(z)$ in Längsrichtung der Sonde 10 vor. In Fig. 1 ist schematisch der auf diese Art und Weise ermittelte Reflexionsfaktorverlauf R in Abhängigkeit der Ortskoordinate d ebenso gezeigt wie das anregende Abfragesignal $S1$ und das empfangene Antwortsignal $S2$. Um aus den errechneten diskreten Werten des Reflexionsfaktors $R(z)$ auf eine kontinuierliche Kurve zu gelangen, kann eines der bekannten Interpolationsverfahren verwendet werden.

[0054] Außer der in den Fig. 1 und 2 dargestellten Anregung durch ein Abfragesignal $S1$ in Form einer geschalteten Gleichspannung, d. h. in Form einer Sprungfunktion, sind auch andere Anregungsfunktionen möglich. Beispielsweise kann das Abfragesignal $S1$ auch die Gestalt eines Chirp-Signals, eines Impuls-Signals oder eines Burst-Signals (= geschaltetes Sinus-Signal) annehmen. Die Sendeleistung des Abfragesignals $S1$ liegt typischerweise im Bereich einiger mW. Die erzielbare Ortsauflösung wird im Wesentlichen durch die Bandbreite des Abfragesignals $S1$ bestimmt. Deshalb wird üblicherweise eine Bandbreite von mindestens 50 MHz verwendet. Typische Werte für die eingesetzte Bandbreite liegen bei 1 GHz. Wenn es sich bei dem zu untersuchenden Medium 30 um Luft handelt, wird mit dieser Bandbreite eine Ortsauflösung von etwa 7,5 cm erreicht. Bei einem anderen Medium 30 mit einer höheren relativen Dielektrizitätskonstante ϵ_r ist sogar eine noch bessere Ortsauflösung zu erreichen. Für Wasser oder Wasserdampf liegt dieser Wert unter 1 cm. Weiterhin kann die Ortsauflösung beeinflusst werden durch die für die Auswertung verwendete fiktive Laufzeit τ . Solange die Abtasttheorie erfüllt ist und auch das Sendesignal eine ausreichende Bandbreite hat, lässt sich durch eine Reduzierung der verwendeten fiktiven Laufzeit τ die Ortsauflösung und damit die Messgenauigkeit des Verfahrens erhöhen.

[0055] Gemäß Gleichung (5) kann aus dem Reflexionsfaktorverlauf R auch der Verlauf der relativen Dielektrizitätskonstante ϵ_r in Längsrichtung der Sonde 10 ermittelt werden. Dies ist insbesondere auch deshalb von Interesse, da aus der Dielektrizitätskonstante ϵ_r die Dichte ρ des Mediums 30 ermittelt werden kann. Für Wasser und Wasserdampf als Medium 30 gibt es einen Zusammenhang zwischen der relativen Dielektrizitätskonstante ϵ_r und der Dichte ρ sowie der Temperatur ϑ :

$$\epsilon_r = 1 + \frac{A1}{\bar{\vartheta}} \cdot \bar{\rho} + \left(\frac{A2}{\bar{\vartheta}} + A3 + A4 \cdot \bar{\vartheta} \right) \cdot \bar{\rho}^2 + \left(\frac{A5}{\bar{\vartheta}} + A6 \cdot \bar{\vartheta} + A7 \cdot \bar{\vartheta}^2 \right) \cdot \bar{\rho}^3 + \left(\frac{A8}{\bar{\vartheta}^2} + \frac{A9}{\bar{\vartheta}} + A10 \right) \cdot \bar{\rho}^4 \quad (9)$$

wobei $A1$ bis $A10$ Konstante sind und $\bar{\vartheta}$ sowie $\bar{\rho}$ eine auf einen Bezugswert normierte Temperatur bzw. Dichte darstellen. Gleichung (9) sowie die Konstanten $A1$ bis $A10$ sind aus dem Fachbuch "Properties of Water and Steam in SI-Units" von E. Schmidt und U. Grigull, Springer-Verlag, 3. Auflage, 1982, Tabelle 9, S. 175 und 176 bekannt. Für ein anderes Medium 30 lässt sich ein ähnlicher Zusammenhang zwischen der relativen Dielektrizitätskonstanten ϵ_r und der Dichte ρ angeben.

[0056] Gleichung (9) gilt allgemein. Bei einem eindeutigen Aggregatzustand hängen jedoch zusätzlich die Dichte ρ und die Temperatur ϑ voneinander ab. Diese Abhängigkeit liegt sowohl bei flüssigem Wasser als auch bei Wasserdampf vor. Der Zusammenhang von Gleichung (9) ist in Fig. 3 für jeweils eindeutige Aggregatzustände dargestellt. Der gestrichelt eingetragene Kurvenabschnitt 320 ist der dampfförmigen Phase und der mit durchgezogener Linie dargestellte Kurvenabschnitt 310 der flüssigen Phase von Wasser zugeordnet. Die Stoßstelle beider Kurvenabschnitte 310 und 320 bezeichnet einen Zustand, bei dem sich der dampfförmige und der flüssige Aggregatzustand annähernd gleich verhalten und auch nebeneinander in Form einer Mischphase vorliegen. Dies tritt bei der sogenannten kritischen Temperatur ($\vartheta = 374^\circ\text{C}$) auf.

[0057] Anhand der eindeutigen Beziehung gemäß Gleichung (9) kann aus dem ermittelten Verlauf der relativen Dielektrizitätskonstante ϵ_r zum einen auf das Vorliegen eines dampfförmigen oder eines flüssigen Aggregatzustands und zum anderen auf die Dichte ρ geschlossen werden. Hierbei ist wiederum die Ermittlung eines Dichteverlaufs in Längsrichtung der Sonde 10 möglich. Dies stellt verglichen mit einem Standard TDR-Verfahren eine wesentliche Erweiterung der Messmöglichkeiten dar.

[0058] Anhand des Dichteverlaufs ρ längs der Sonde 10 kann auch ohne weiteres eine Füllstandsmenge oder eine Füllstandshöhe des Mediums 30 oder der Teilbefüllung 31 im Behälter 20 ermittelt werden. Dies ist eine wichtige Diagnoseinformation für die Betriebssicherheit des Behälters 20.

[0059] In Fig. 4 ist eine Sonde 11 dargestellt, die beispielsweise in der Vorrichtung gemäß Fig. 1 eingesetzt wird. Die Sonde 11 erstreckt sich praktisch über die komplette Länge des Behälters 20 also vom Behälteroberteil bis zum Behälterunterteil. Die Sonde 11 ist aufgebaut als koaxialer Wellenleiter mit einem Außenleiter 110 sowie einem Innenleiter 120. Der bei dem vorstehend beschriebenen Verfahren ermittelte Reflexionsfaktor R und die Impedanz Z wird bei dieser Ausgestaltung der Sonde 11 durch das Medium bestimmt, das sich im Zwischenraum zwischen dem Innen- und Außenleiter 120 bzw. 110 befindet. Damit das Medium 30 in diesen Innenraum eindringen kann, sind in dem Außenleiter 110 Öffnungen 115 vorgesehen.

[0060] Je nach Bedarf kann auch das untere Ende der Sonde 11 mit einer Öffnung versehen sein. Der vorab einmal zu ermittelnde Geometrieparameter A_{Ge0} von Gleichung (2) wird bei der koaxialen Geometrie der Sonde 11 im Wesentlichen durch den Außenleiterdurchmesser 111 sowie den Innenleiterdurchmesser 121 bestimmt.

[0061] Andere Ausführungsformen für die Sonde 10 sind ebenfalls möglich. Beispielsweise kann die Sonde auch als Eindrahtheiter vor der metallischen Behälterwand oder als Zweidrahtheiter oder als Hohlleiter ausgebildet sein.

[0062] Gemäß Gleichung (9) geht in die Ermittlung der Dichte ρ neben der relativen Dielektrizitätskonstanten ϵ_r auch die Temperatur ϑ ein. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit ist es deshalb von Nutzen, wenn neben dem Antwortsignal $S2$ auch mindestens ein zusätzlicher Messwert für die Temperatur ϑ im Behälter 20 erfasst wird. Die Genauigkeit der aus dem Abfragesignal $S2$ abgeleiteten Messgrößen wird um so höher, je mehr und je bessere Informationen auch über die Temperaturverteilung längs der Sonde 10 vorliegen. Aus diesem Grund gibt es eine weitere Ausführungsform für eine Sonde 13, bei der mehrere Temperatursensoren 131 bis 135 an der Sonde 13 angeordnet sind. Diese weitere Ausführungsform ist in Fig. 5 gezeigt. Sie enthält temperaturabhängige Resonatoren aus einem insbesondere piezoelektrischen

Material, wie z. B. Quarz. Für eine Hochtemperaturanwendung mit Temperaturen von 800°C und höher eignet sich insbesondere Langasit als Material für die Temperatursensoren 131 bis 135. Die Sonde 13 enthält außerdem als weiteren Unterschied zur Sonde 11 von Fig. 4 einen hohlen Innenleiter 125. Beide Ausgestaltungen als Voll- oder als Hohlkörper eignen sich gleichermaßen für den Innenleiter 120 bzw. 125.

5 [0063] Die Temperatursensoren 131 bis 135 können als Resonator oder als Laufzeitglied ausgebildet sein. Je nach Ausführungsform wird dann entweder eine temperaturabhängige Resonanzfrequenz oder eine temperaturabhängige Laufzeit für die Temperatursensoren 131 bis 135 ermittelt. Beispielsweise erfolgt die Abfrage bei der Resonator-Ausführungsform über ein Sweep-Signal und bei der Laufzeitglied-Ausführungsform im Impuls-Echoverfahren. Die Laufzeit innerhalb eines Laufzeitgliedes liegt dabei aufgrund der akustischen Ausbreitung deutlich über der Laufzeit des Abfragesignals S1 durch die komplette Sonde 13.

10 [0064] Die Detektion des Antwortsignals S2 erfolgt in einer sehr kurzen Zeitspanne, vorzugsweise im Bereich zwischen einigen 100 ns und einigen μ s. Aufgrund dieser sehr kurzen Messdauer ist das beschriebene Verfahren auch unempfindlich gegenüber innerhalb des Mediums 30 auftretenden Turbulenzen. Die durch Turbulenzen hervorgerufenen Änderungen im Behälter und im Bereich um die Sonde 10 sind nämlich stets deutlich langsamer als die für die Messung benötigte Zeitspanne. Dabei spielt es auch überhaupt keine Rolle, dass die gegebenenfalls für die Auswertung benötigte Zeit über dieser kurzen Messdauer liegt, da das Antwortsignal S2 in der Auswerteeinheit 3 bei Bedarf zwischengespeichert werden kann.

15 [0065] Mittels einer anderen Sonde 14 kann die Messgenauigkeit weiter erhöht werden. Diese spezielle Ausführungsform der Sonde 14 ist in Fig. 6 dargestellt. Die Sonde 14 enthält in Längsrichtung mehrere Referenzmarken 141 bis 145, die bei Anregung durch das Abfragesignal S1 zu einem Anteil S23 im Antwortsignal S2 führt, der ebenfalls in Fig. 6 dargestellt ist. Die Referenzmarken 141 bis 145 befinden sich an bekannten Stellen der Sonde 14. Bei korrekter Auswertung sollte dann ein Reflexionsfaktorverlauf R oder ein Impedanzverlauf Z diese Referenzmarken an den richtigen Orten wiedergeben. Andernfalls können die erkannten Abweichungen zu einer Korrektur der Auswertung herangezogen werden.

25

Patentansprüche

1. Verfahren zur Dichtebestimmung eines in einem Behälter (20) befindlichen Mediums (30) mittels einer in den Behälter (20) hineinragenden Sonde (10), bei dem
 - a) ein Abfragesignal (S1) in die Sonde (10) eingespeist wird,
 - 30 b) ein durch das Abfragesignal (S1) hervorgerufenes Antwortsignal (S2) detektiert wird,
 - c) ein Reflexionsfaktor- oder Impedanzverlauf (R, Z) des Mediums (30) längs der Sonde (10) mittels des Zeitverlaufs des Antwortsignals (S2) und
 - d) ein Dichteverlauf (ρ) des Mediums (30) längs der Sonde (10) mittels des Reflexionsfaktor- oder Impedanzverlaufs (R, Z) bestimmt werden.
- 35 2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der Reflexionsfaktor- oder Impedanzverlauf (R, Z) rekursiv aus dem Antwortsignal (S2) ermittelt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei zur Ermittlung des Reflexionsfaktor- oder Impedanzverlaufs (R, Z)
 - a) das Medium (30) fiktiv in quer zur Sonde (10) verlaufende Schichten (101, 102, 103) mit jeweils gleicher vorgebbarer Laufzeit (τ) des Abfragesignals (S1) durch die Schicht (101, 102, 103) eingeteilt wird und
 - 40 b) sukzessiv in Einspeiserichtung des Abfragesignals (S1) für jede Schicht (101, 102, 103)
 - b1) ein aktueller Reflexionsfaktor (R) an der Grenze zwischen einer aktuellen und der angrenzenden vorhergehenden Schicht (101, 102, 103) mittels des Abfragesignals (S1), des Antwortsignals (S2) und der bereits ermittelten Reflexionsfaktoren (R) zwischen allen vorhergehenden Schichten (101, 102, 103),
 - b2) eine aktuelle Ausbreitungsgeschwindigkeit (c) in der aktuellen Schicht (101, 102, 103) mittels der Ausbreitungsgeschwindigkeit (c) der angrenzenden vorhergehenden Schicht (101, 102, 103) und des aktuellen Reflexionsfaktors (R) und
 - 45 b3) eine in Einspeiserichtung des Abfragesignals (S1) gerichtete örtliche Ausdehnung der aktuellen Schicht (101, 102, 103) mittels der Laufzeit (τ) und des aktuellen Reflexionsfaktors (R) bestimmt wird und
 - 50 b4) ein mittels der örtlichen Ausdehnung der angrenzenden vorhergehenden Schicht (101, 102, 103) bestimmter Ort der Grenze zwischen aktueller und angrenzender vorhergehender Schicht (101, 102, 103) dem aktuellen Reflexionsfaktor (R) zugeordnet wird.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zur Ermittlung des Dichteverlaufs (ρ) sukzessiv in Einspeiserichtung des Abfragesignals (S1) für jede Schicht (101, 102, 103)
 - 55 a) eine aktuelle relative Dielektrizitätskonstante (ϵ_r) mittels des aktuellen Reflexionsfaktors (R) und der relativen Dielektrizitätskonstante (ϵ_r) der angrenzenden vorhergehenden Schicht (101, 102, 103) und
 - b) ein aktueller Dichtewert (ρ), der der aktuellen Schicht (101, 102, 103) zugeordnet wird, mittels der aktuellen relativen Dielektrizitätskonstante (ϵ_r) ermittelt wird.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem mittels des Reflexionsfaktor- oder Impedanzverlaufs (R, Z) ein Füllstand abgeleitet wird.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem mittels des Reflexionsfaktor- oder Impedanzverlaufs (R, Z) ein Aggregatzustand abgeleitet wird.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem als Abfragesignal (S1) ein sprungförmiges Signal, ein impulsförmiges Signal oder ein Chirp-Signal verwendet wird.
- 65 8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Abfragesignal (S1) mit einer Bandbreite von mindestens 50 MHz, insbesondere von mindestens 100 MHz, eingespeist wird.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Temperatur innerhalb des Behälters (20) erfasst wird.

10. Verfahren nach Anspruch 9, bei dem die Temperatur zumindest an einer Stelle der Sonde (13) detektiert wird.
11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, bei dem die Temperatur zur Bestimmung der Dichte herangezogen wird.
12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem über das Abfragesignal (S1) mindestens eine Referenzmarke (141, 142, 143, 144, 145), die an einer definierten Stelle der Sonde (14) angebracht ist, abgefragt wird und ein durch die Referenzmarke (141 bis 145) im Antwortsignal verursachtes Teilsignal (S23) zur Ermittlung des Reflexionsfaktor- oder Impedanzverlaufs (R, Z) des Mediums (30) längs der Sonde (14) herangezogen wird. 5
13. Vorrichtung zur Dichtebestimmung eines in einem Behälter (20) befindlichen Mediums (30) mittels einer in den Behälter (20) hineinragenden Sonde (10), umfassend mindestens
 - a) Mittel (4, 5, 15) zur Erzeugung und Einspeisung eines Abfragesignals (S1) in die Sonde (10),
 - b) Mittel (15, 3) zur Detektion und Auswertung eines durch das Abfragesignal (S1) hervorgerufenen Antwortsignals (S2), wobei 10
 - c) die Mittel (3) zur Detektion und Auswertung ausgebildet sind zur Bestimmung eines Reflexionsfaktor- oder Impedanzverlaufs (R, Z) des Mediums (30) längs der Sonde (10) mittels des Zeitverlaufs des Antwortsignals (S2) und zur Bestimmung eines Dichteverlaufs (ρ) des Mediums (30) längs der Sonde (10) mittels des Reflexionsfaktor- oder Impedanzverlaufs (R, Z). 15
14. Vorrichtung nach Anspruch 13, bei der die Mittel (3) zur Detektion und Auswertung ausgebildet sind zur rekursiven Bestimmung des Reflexionsfaktor- oder Impedanzverlaufs (R, Z).
15. Vorrichtung nach Anspruch 13 oder 14, bei der die Mittel (4) zur Erzeugung ausgelegt sind zur Erzeugung eines Sprung-, impuls- oder chirpförmigen Abfragesignals (S1).
16. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 13 bis 15, bei der die Mittel (4) zur Erzeugung ausgelegt sind zur Erzeugung eines Abfragesignals (S1) mit einer Bandbreite von mindestens 50 MHz, insbesondere von mindestens 100 MHz. 20
17. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 13 bis 16, bei der innerhalb des Behälters (20) mindestens ein Temperatursensor (131–135) angeordnet ist.
18. Vorrichtung nach Anspruch 17, bei der der mindestens eine Temperatursensor (131–135) an der Sonde (13) angeordnet ist. 25
19. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 13 bis 18, bei der mindestens eine Referenzmarke (141–145) an der Sonde (14) angeordnet ist.

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

30

35

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -

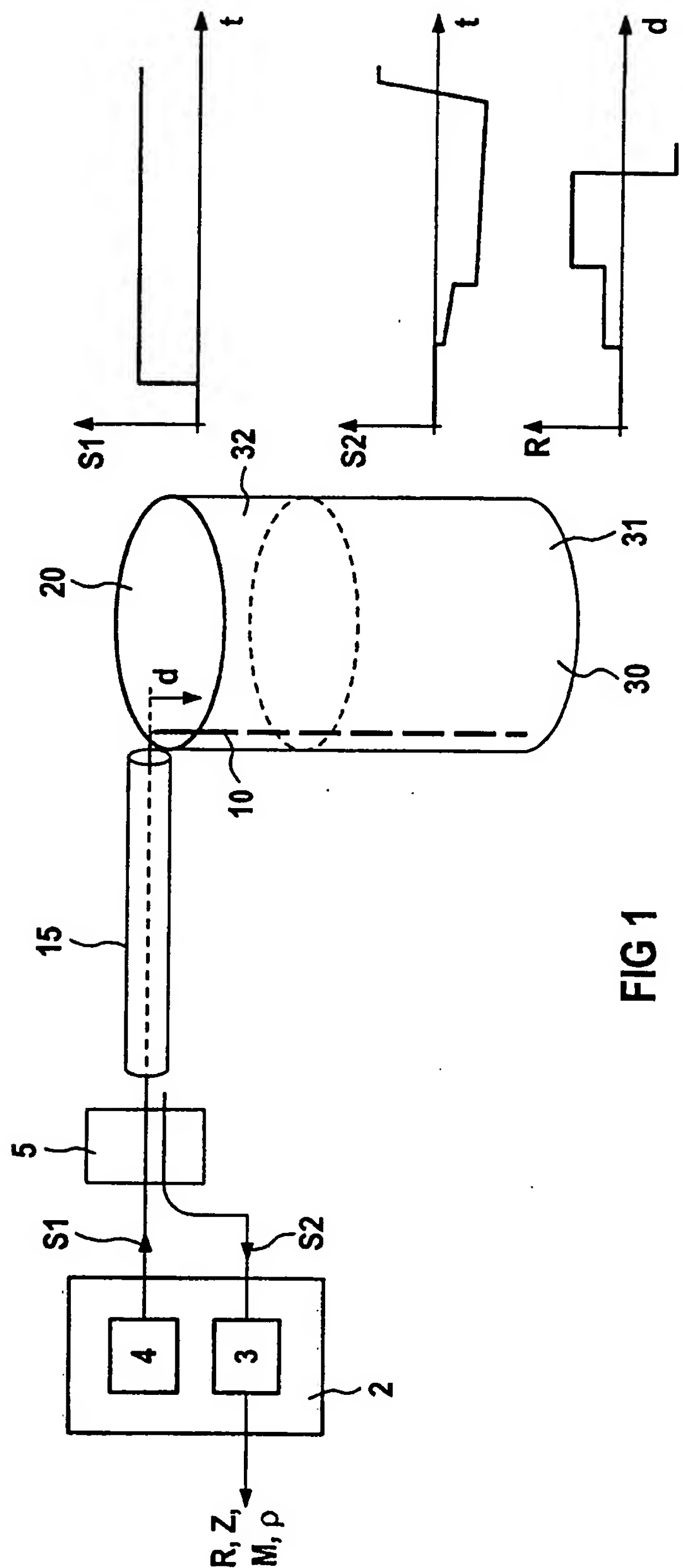


FIG 1

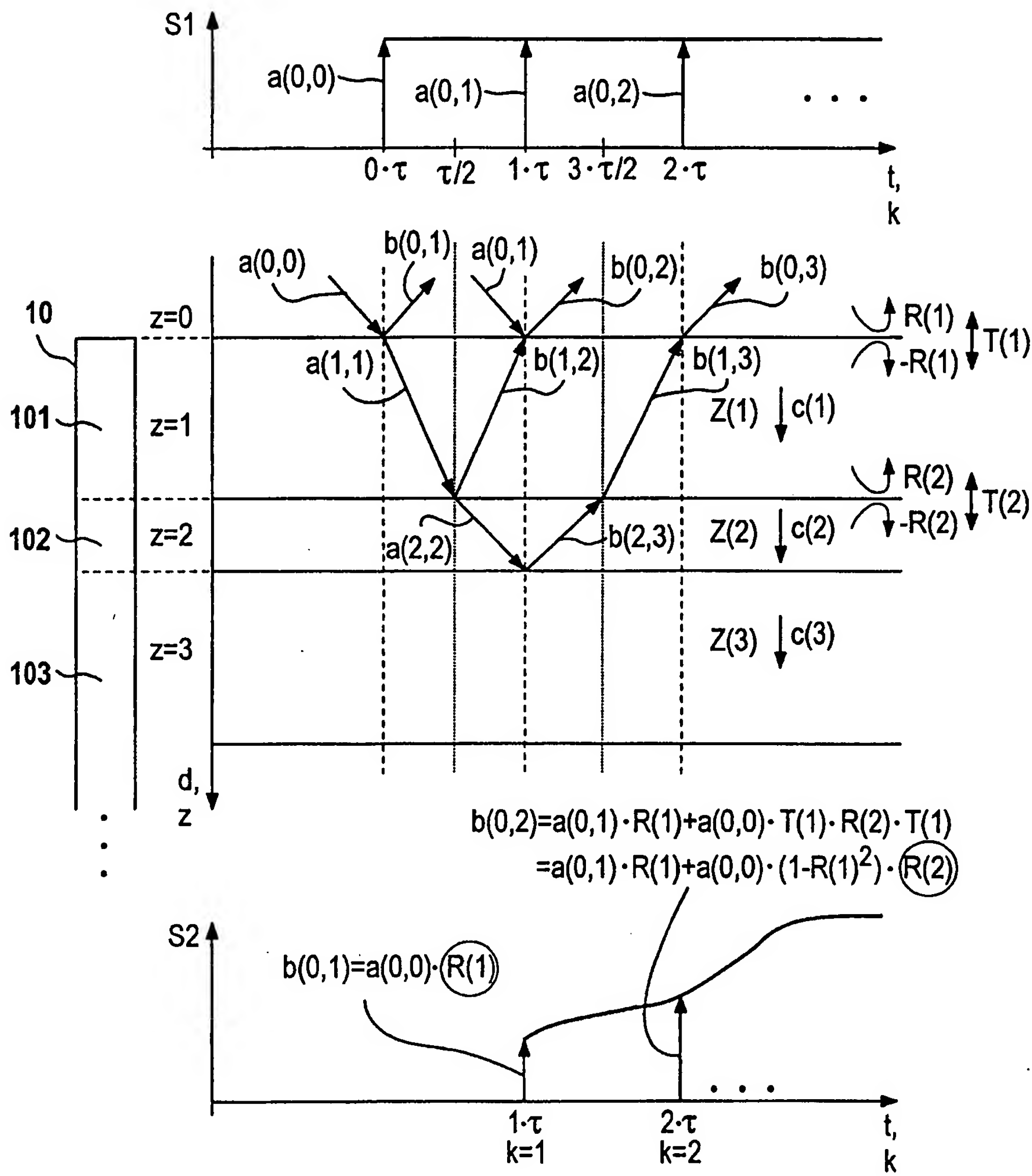


FIG 2

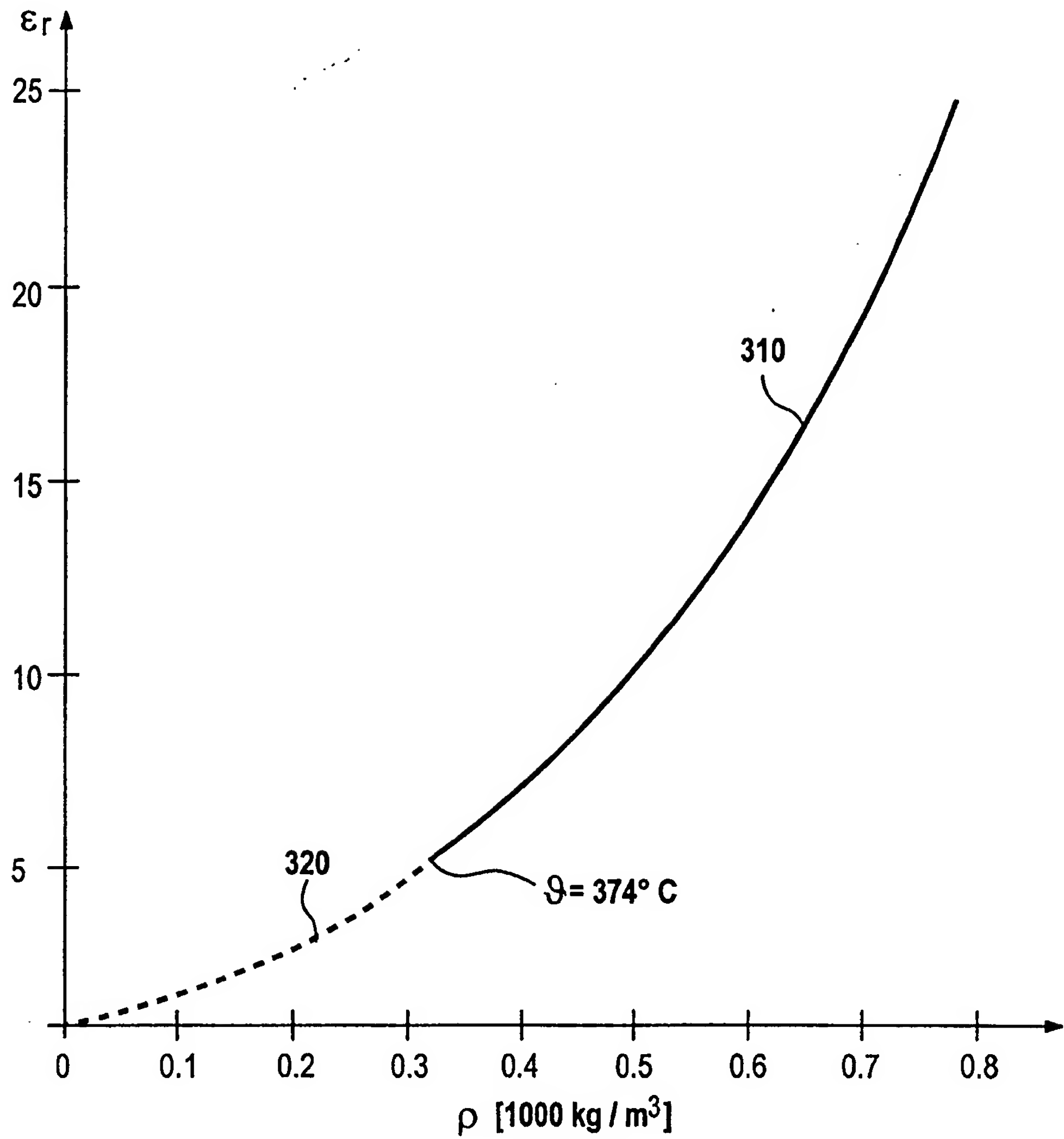


FIG 3

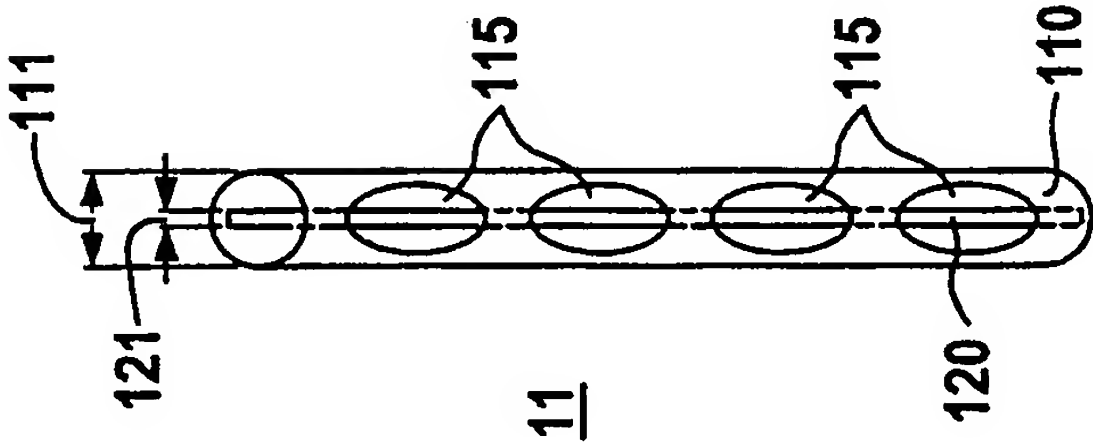


FIG 4

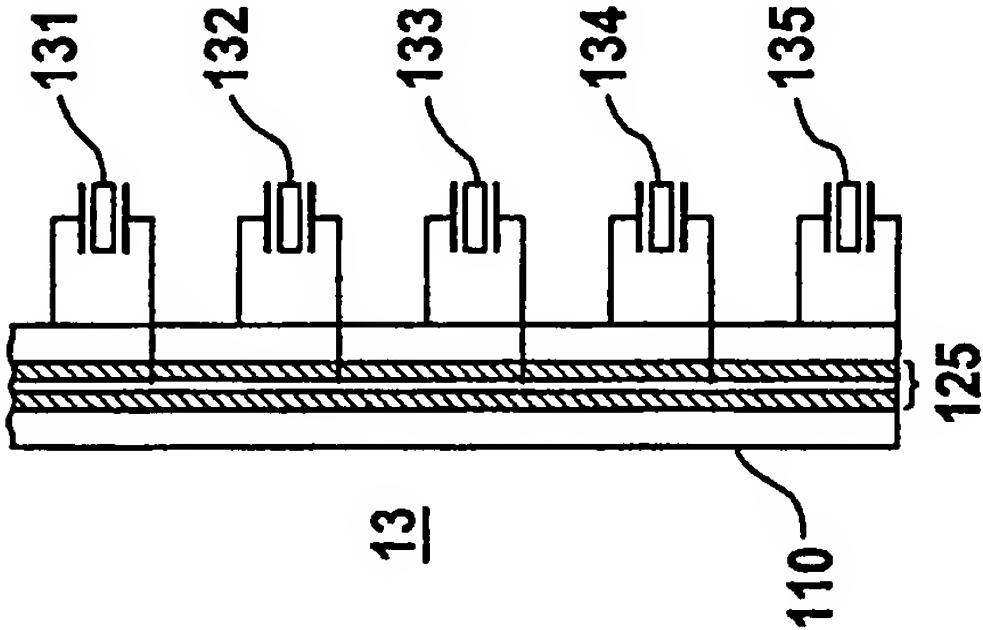


FIG 5

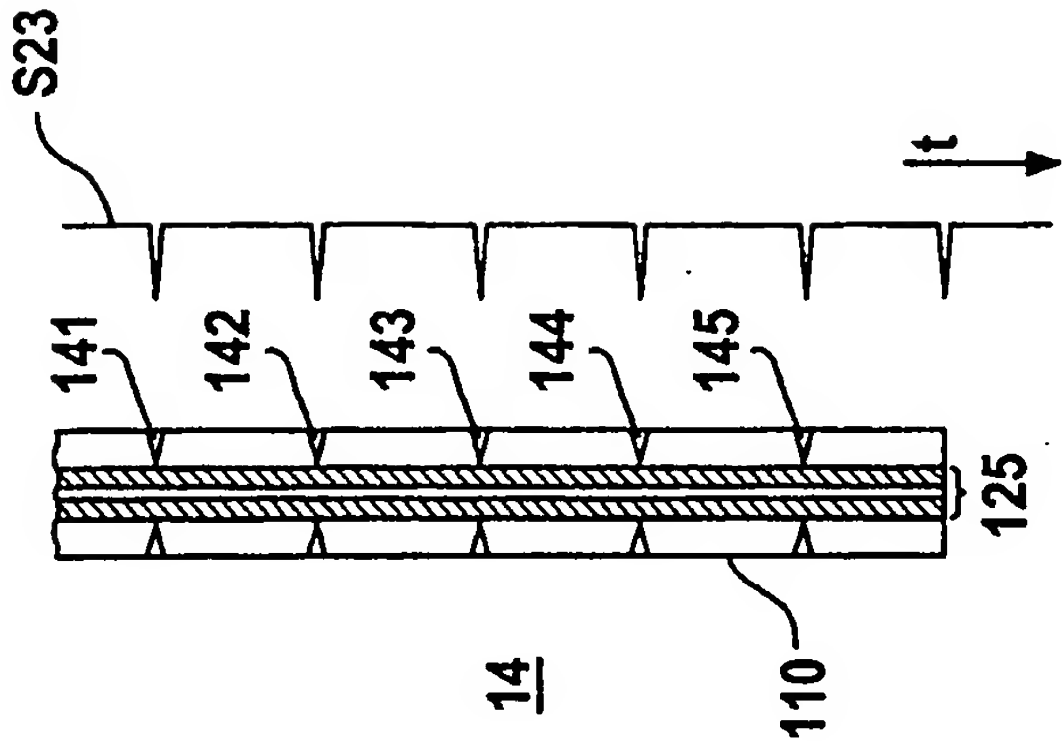


FIG 6